

другие источники потери массы могут существенно уменьшить отношение $M_{\text{невидим}}/M_{\text{видим}}$ [см. Новиков, Озерной (1964)].

При рассмотрении числа коллапсировавших звезд формально минимальная масса исходной звезды равна $3,2 M_{\odot}$: это есть масса покоя критической нейтронной звезды (см. табл. XIV в главе о пульсарах). Именно эта величина, а не масса нейтронной звезды после потери энергии (около $2 M_{\odot}$) должна войти в теорию. Однако ввиду неточности вычисления $M_{\text{крит}}$ (см. стр. 319) мы приняли $M_{0, \text{крит}} \approx 2M_{\odot}$.

Фактически (см. § 4 гл. 11 и Приложение 2) потери массы при образовании нейтронных звезд весьма велики. До настоящего времени нет последовательных расчетов, охватывающих весь период спокойной эволюции до релятивистского коллапса. Можно, например, лишь очень грубо предположить, что коллапсары возникают лишь из звезд с $M_0 > 30M_{\odot}$. Согласно замечанию Камерона (1971), приведенному в § 1 данной главы, не исключено, что этот процесс сопровождается выделением энергии меньшим, чем при рождении нейтронной звезды (пульсара).

Наконец, напомним, что опыты Вебера, если правильна его интерпретация, требуют присутствия большого числа отонов в ядре нашей Галактики. Только столкновения отонов между собой способны рождают мощные импульсы гравитационного излучения без сопровождения их выделением энергии в обычных формах и в виде нейтрино.

Астрономия в настоящее время стоит на пороге двух тесно связанных между собой событий грандиозной важности: приближается обнаружение и идентификация отдельных релятивистских объектов; назревает понимание роли таких объектов в эволюции звезд, галактик, ядер галактик и квазаров.

§ 5. Отоны космологического происхождения

До сих пор мы говорили главным образом о черных дырах, являющихся конечным этапом релятивистского коллапса звезд достаточно большой массы.

Образование отдельных звезд во Вселенной из разреженного первоначально вещества возможно лишь на сравнительно поздней стадии космологического расширения, в «наше время». В горячей модели Вселенной на ранней стадии давление излучения препятствует проявлению гравитационной неустойчивости расширяющегося вещества, и обособление отдельных тел, как результат роста малых возмущений, невозможно.

Однако в принципе возможно, что с самого начала космологического расширения в отдельных местах были большие неоднородности и отклонения метрики от однородной и изотропной. В этом случае возможно обособление отдельных масс. В горячей модели Вселенной на ранней стадии плотность излучения (а так-

же пар — частиц и античастиц всех сортов) гигантски превосходит плотность барионов. Рано обособившиеся тела должны состоять в основном из квантов и пар. Но, как мы показали выше, устойчивое равновесие ультрарелятивистского газа в собственном поле тяготения невозможно и обособившаяся масса будет коллапсировать. Поэтому массы, обособившиеся на ранней стадии, представляли бы собой нечто вроде так называемых геонов Уилера (1960), состоящих в основном из квантов и пар, однако не статических, а коллапсирующих и образующих черные дыры.

Мыслим и другой тип сильной неоднородности на раннем этапе расширения [Новиков (1964b), Неeman (1965)]. Предположим, что в начальный момент космологического расширения начало расширяться не все вещество Вселенной. Некоторые области (ядра) задержались и по общему «мировому» времени некоторый период не расширяются. Эта задержка по времени внешнего наблюдателя может быть произвольной длительности и для разных ядер разная. Затем происходит расширение ядра и его вещество выходит из под гравитационного радиуса. Расширение ядра внешний наблюдатель видит как взрыв, выделение огромной энергии.

Математическая модель подобного задержавшегося в расширении, а затем взрывающегося ядра построена в § 14 гл. 2 как модель «белой дыры» *). Такая модель конкретизирует, в некотором смысле, идею сверхплотных D -тел, давно развиваемую В. А. Амбарцумяном (1961, 1964).

Наконец, если энергии задерживавшегося ядра не хватает для выхода из-под гравитационного радиуса к внешнему наблюдателю, то имеет место «серая дыра», метрика которой (при отсутствии вращения) является метрикой Крускала. «Серая дыра» отличается от белой тем, что основная масса материи, создающая гравитационное поле, никогда не выходит в R -область (см. § 13 гл. 2) внешнего наблюдателя.

Могут ли все эти космологические отоны реально существовать в природе? Каковы их свойства, и не противоречит ли гипотеза об их существовании наблюдениям? К сожалению, в этом отношении теоретиками сделано очень мало и неизвестны ответы даже на многие принципиальные вопросы.

Мы остановимся лишь на двух моментах.

Прежде всего, в горячей модели неизбежна на раннем этапе аккреция излучения отонами [Зельдович, Новиков (1966)]. Для оценок воспользуемся полученными в гл. 12 формулами для стационарной аккреции: по порядку величины для роста массы

*) В § 14 гл. 2 рассмотрен сферически-симметричный случай. При наличии вращения необходимо рассматривать метрику Керра; см. § 3 гл. 3.

отона имеем

$$\frac{dM}{dt} = r_g^2 c \rho_r, \quad (14.5.1)$$

где r_g — гравитационный радиус отона, ρ_r — плотность окружающей материи. Зная из космологии, что плотность меняется как $\rho_r \approx \frac{1}{Gt^2}$, легко проинтегрировать (14.5.1). Интеграл слабо зависит от верхнего предела (положим его равным бесконечности):

$$M = \frac{M_0}{1 - \frac{GM_0}{c^3 t_0}}. \quad (14.5.2)$$

Здесь M_0 — масса отона в момент его образования t_0 . M конечно, когда $t_0 > \frac{GM_0}{c^3}$. Интеграл расходится, когда $t_0 \rightarrow \frac{GM_0}{c^3}$. Од-

нако именно при $t_0 \sim \frac{GM_0}{c^3}$ несправедливо предположение о стационарной аккреции, так как характерные времена процесса сравниваются со временем изменения ρ_r . Поэтому ответ на вопрос, не является ли аккреция на космологический отон катастрофически большой на раннем этапе, требует решения нестационарной задачи. Возможно, ответ зависит от выбора начальных условий. К сожалению, эта проблема до сих пор не решена.

Однако мы можем уже сейчас сказать, что если отоны и были в начале космологического расширения, то их не могло быть слишком много. Действительно, предположим, что на некоторый ранний момент t_* доля α всего вещества находится в форме отонов *). Основная масса материи находилась в форме квантов и пар. Известно, что плотность массы покоя барионов составляет малую долю β полной плотности в момент t_* . Плотность массы квантов и релятивистских пар уменьшается с расширением быстрее, чем плотность массы покоя барионов из-за адиабатического охлаждения фотонного газа, и к настоящему моменту плотность излучения много меньше плотности обычного вещества. Плотность усредненной массы всех отонов меняется с расширением так же, как и плотность массы покоя барионов $\frac{\rho_{от}}{\rho_{бар}} = \text{const}$. Поэтому

$\frac{\rho_{от}}{\rho_{бар}}$ в настоящий момент такие же, как и в момент t_* .

В момент t_* , по определению,

$$\frac{\rho_{от}}{\rho_{бар}} = \frac{\alpha}{\beta(1-\alpha)}. \quad (14.5.3)$$

*) Не будем учитывать аккрецию на отоны; учет ее только усилит результат.

Для левой части (14.5.3) можно дать оценку из сегодняшних наблюдений. Известно, что отношение трудно наблюдаемых форм материи (в том числе, возможно, и отонов) к наблюдаемой материи в форме звезд и излучающего или поглощающего диффузного вещества есть

$$\frac{\rho_{\text{невид}}}{\rho_{\text{вид}}} < 160.$$

Отсюда и из (14.5.3) следует:

$$\frac{\alpha}{\beta(1-\alpha)} < 160.$$

Таким образом, отсюда при малых β , величина α должна быть тоже малой. Для $\alpha \ll 1$ имеем

$$\alpha < 160\beta.$$

Следует подчеркнуть, что количество белых дыр, взорвавшихся за последние $\sim 9 \cdot 10^{10}$ лет и рассеявшихся в виде света и нейтрино, должно быть гораздо меньше, чем дается последним неравенством. Дело в том, что общее количество выделившегося света должно быть меньше реликтового излучения горячей Вселенной. Это дает для таких белых дыр $\alpha_1 < 0,03 \beta$.

В заключение еще раз напомним, что все содержание этой главы относилось к гипотетическим объектам, еще не открытым. «Черные дыры», как результат коллапса массивных звезд, почти наверняка существуют в природе. Авторы были бы очень удивлены, если бы оказалось, что какие-то процессы с необходимостью приводят звезду как раз к потере такой доли массы, чтобы предотвратить релятивистский коллапс.

Открытие «черных дыр», как мы надеемся, дело ближайшего будущего.

Что касается космологических отонов, то здесь предстоит еще большая работа, чтобы превратить гипотезу в уверенные представления.

Имеют ли белые дыры какое-либо отношение к взрывам квазаров или ядер галактик? Мнения по этому вопросу различны и часто менялись. Пока можно сказать лишь, что мы слишком мало знаем об этом.